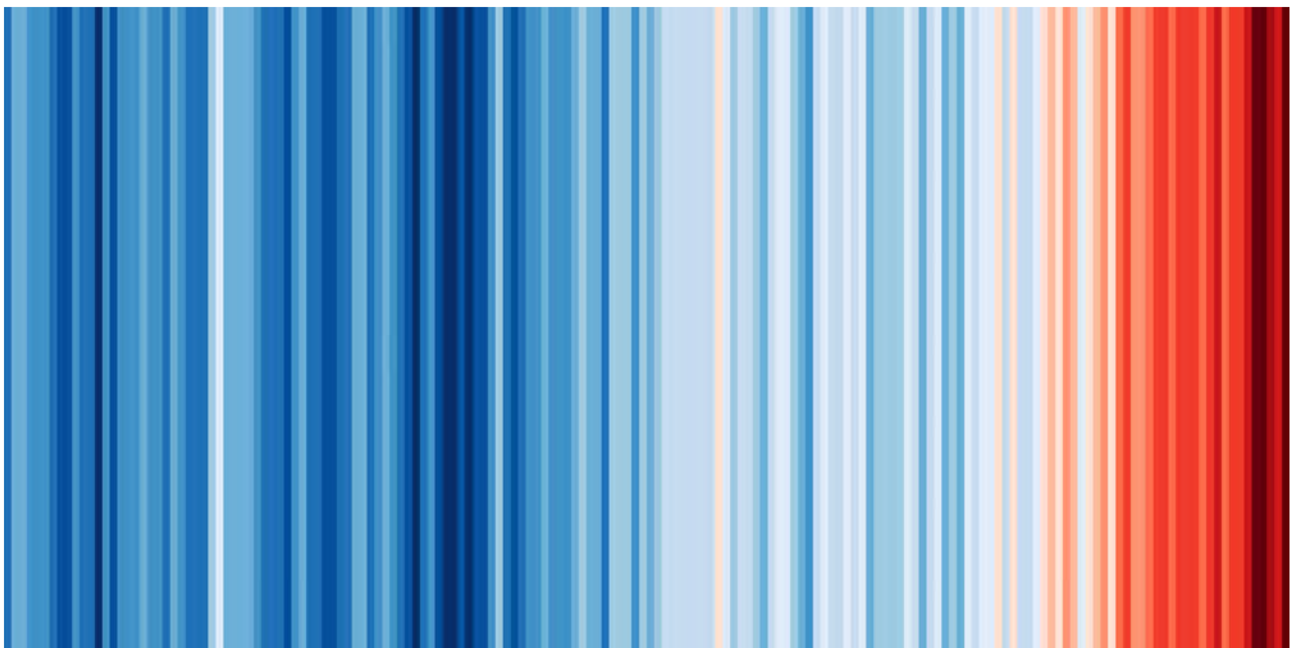
WAS WIR HEUTE ÜBERS KLIMA WISSEN

BASISFAKTEN ZUM KLIMAWANDEL, DIE IN DER WISSENSCHAFT UNUMSTRITTEN SIND

Stand: Juni 2021



herausgegeben von:

Deutsches Klima-Konsortium, Deutsche Meteorologische Gesellschaft, Deutscher Wetterdienst, Extremwetterkongress Hamburg, Helmholtz-Klima-Initiative, klimafakten.de

Deutsches Klima Konsortium · DMG Deutsche Meteorologische Gesellschaft · Deutscher Wetterdienst – Wetter und Klima aus einer Hand · ExtremWetterKongress www.ewk2021.de · HELMHOLTZ KLIMA INITIATIVE · klimafakten.de

VISIT…

LANZAROTE

Caliente.COM

DIE FÜNF KERNINFOS ZUM KLIMAWANDEL IN NUR 20 WORTEN[1]:

1. ER IST REAL.
2. WIR SIND DIE URSACHE.
3. ER IST GEFÄHRLICH.
4. DIE FACHLEUTE SIND SICH EINIG.
5. WIR KÖNNEN NOCH ETWAS TUN.

INHALT

GRUNDLAGEN ZUM KLIMAWANDEL ... 4

1. DER NATÜRLICHE TREIBHAUSEFFEKT ... 4
2. DER MENSCH VERSTÄRKT DEN TREIBHAUSEFFEKT ... 4
3. URSACHEN VON KLIMAÄNDERUNGEN – INTERNE SCHWANKUNGEN ... 5
4. URSACHEN VON KLIMAÄNDERUNGEN – ÄUSSERE EINFLÜSSE ... 6
5. KLIMAMODELLE ... 7

GLOBALER KLIMAWANDEL ... 9

6. WELTWEITE ERWÄRMUNG ... 9
7. BEISPIELLOSE HÄUFUNG VON REKORDEN ... 10
8. DAS ARKTISCHE MEEREIS SCHWINDET ... 10
9. FESTLAND-EIS UND SCHNEEDECKE SCHRUMPFEN ... 11
10. DIE MEERESSPIEGEL STEIGEN – UND ZWAR IMMER SCHNELLER ... 12
11. OZEANE VERSAUERN, KORALLEN STERBEN ... 13
12. WETTEREXTREME NEHMEN ZU, REGIONAL SINKEN ERNTEERTRÄGE ... 13

KLIMAWANDEL IN DEUTSCHLAND ... 14

13. BEREITS KNAPP 2°C ERWÄRMUNG – DEUTLICH MEHR ALS DER WELTWEITE DURCHSCHNITT ... 14
14. BEISPIELLOSE HÄUFUNG VON WÄRME-REKORDJAHREN ... 15
15. MEHR HITZE, WENIGER FROST ... 15
16. MEHR STARKREGEN – UND ZUGLEICH LÄNGERE TROCKENZEITEN ... 16
17. PFLANZEN UND TIERE REAGIEREN SENSIBEL AUF DIE ERWÄRMUNG ... 18
18. LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT LEIDEN BEREITS UNTER DEM KLIMAWANDEL ... 19
19. DIE WALDBRANDGEFAHR NIMMT ZU ... 19
20. BINNENSEEN IN DEUTSCHLAND SIND DEUTLICH WÄRMER GEWORDEN ... 19
21. AUCH DIE TEMPERATUREN VON NORD- UND OSTSEE NEHMEN ZU ... 20
22. DIE MEERESSPIEGEL STEIGEN AUCH AN DEN DEUTSCHEN KÜSTEN VON NORD- UND OSTSEE ... 20

KÜNFTIGE ENTWICKLUNG ... 21

23. DAS 1,5-GRAD-LIMIT WIRD BEI GEGENWÄRTIGER POLITIK VERFEHLT ... 21
24. STARKE EMISSIONSSENKUNGEN SIND MÖGLICH ... 21
25. MÖGLICHERWEISE UNUMKEHRBARE VERÄNDERUNGEN ... 22
26. JEDES ZEHNTELGRAD ZÄHLT ... 23

DKK Deutsches Klima Konsortium
DMG Deutsche Meteorologische Gesellschaft
Deutscher Wetterdienst DWD Wetter und Klima aus einer Hand
ExtremWetterKongress www.ewk2021.de
HELMHOLTZ KLIMA INITIATIVE
klimafakten.de

GRUNDLAGEN ZUM KLIMAWANDEL

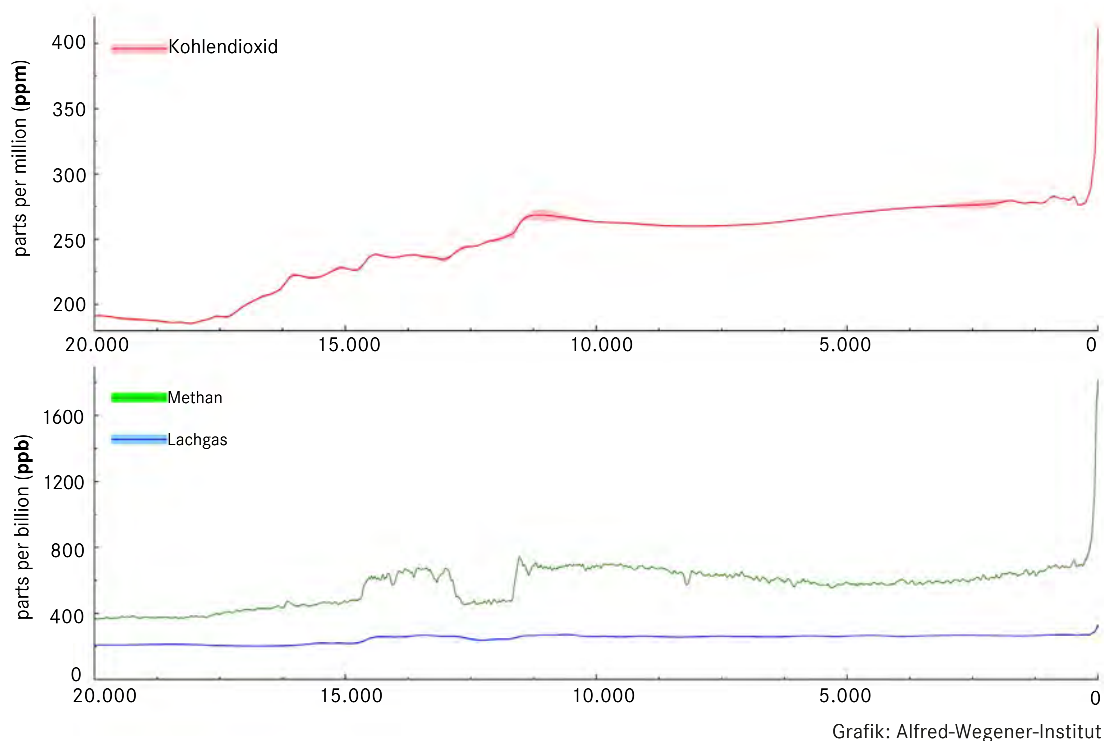
1. DER NATÜRLICHE TREIBHAUSEFFEKT

Einige Spurengase und Partikel in der Lufthülle der Erde sorgen dafür, dass ein Teil der Energie, die über die Sonneneinstrahlung ankommt, nicht unmittelbar von der Erdoberfläche in Form von Infrarotstrahlung abgestrahlt wird. Die Gase werden „Treibhausgase" genannt, ihre Wirkung „Treibhauseffekt". Die wichtigsten Treibhausgase sind Wasserdampf, Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) und Lachgas (N_2O), die sich unterschiedlich lang in der Atmosphäre halten.[2]

Ohne Treibhausgase (aber bei ansonsten gleichbleibenden Bedingungen) wäre es auf der Erdoberfläche im Mittel etwa minus 18 °C kalt. Durch den Treibhauseffekt wird die Erde also überhaupt erst bewohnbar, die Temperatur steigt um circa 32 °C auf rund plus 14 °C. Diese grundsätzlichen Zusammenhänge sind seit mehr als 150 Jahren bekannt. Sie sind in der Wissenschaft unumstritten und durch zahlreiche Experimente und Messungen belegt.[3]

2. DER MENSCH VERSTÄRKT DEN TREIBHAUSEFFEKT

KONZENTRATION DER TREIBHAUSGASE KOHLENDIOXID, METHAN UND LACHGAS IN DER ATMOSPHÄRE
WÄHREND DER ZURÜCKLIEGENDEN 20.000 JAHRE



Grafik: Alfred-Wegener-Institut

Seit Beginn der Industrialisierung am Ende des 18. Jahrhunderts, also seit mehr als 200 Jahren, nimmt die Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre stark zu. Bei Kohlendioxid ist die Ursache

hauptsächlich das Verbrennen kohlenstoffhaltiger Energieträger, die im Laufe der Erdgeschichte entstanden sind („fossile Energieträger“) – vor allem Kohle, Erdöl und Erdgas. Bei Methan zählen zu den Hauptquellen die intensive Landwirtschaft (insbesondere die Nutztierhaltung) und die Nutzung fossiler Energieträger (unter anderem durch Lecks an Erdgas-Bohrlöchern oder -Leitungen). Lachgas wird vor allem in der Landwirtschaft zusätzlich freigesetzt (beispielsweise durch den Einsatz großer Mengen Kunstdünger).[4]

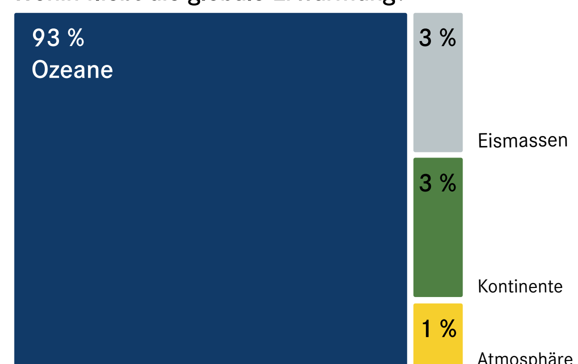
Zugleich wurden und werden große Waldflächen abgeholzt oder abgebrannt, Moore trockengelegt, die Nutzungen von Böden verändert. Dadurch werden einerseits weitere Treibhausgase freigesetzt; andererseits gibt es dann weniger Wälder, die Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufnehmen und binden können.

Die Konzentration von Kohlendioxid in der Erdatmosphäre lag 2020 im Jahresmittel bei 414 ppm (Teilchen pro Million Luftmoleküle, gemessen an der Referenzstation Mauna Loa auf Hawaii und repräsentativ für die Nordhalbkugel).[5] Dies bedeutet eine Zunahme um fast 50 Prozent gegenüber dem Niveau vor Beginn der Industrialisierung. Besonders steil war der Anstieg in vergangenen drei Jahrzehnten.[6] Die CO_2-Konzentration liegt damit viel höher als jemals in den zurückliegenden 800.000 - wahrscheinlich sogar drei Millionen Jahren.[7]

Bei Methan war 2020 mit im Jahresmittel 1.879 ppb (Teilchen pro Milliarde Luftmoleküle, globaler Durchschnitt) bereits rund das Zweieinhalbfache des vorindustriellen Niveaus erreicht.[8] Weil die Treibhauswirkung von Methan pro Molekül etwa 25-mal so stark ist wie jene von Kohlendioxid, hat auch dieser Anstieg einen erheblichen Klimaeffekt. Die Konzentration von Lachgas (auch Distickstoffmonoxid genannt) in der Atmosphäre hat seit Beginn der Industrialisierung von 270 ppb auf mehr als 330 ppb zugenommen.[9]

3. URSACHEN VON KLIMAÄNDERUNGEN — INTERNE SCHWANKUNGEN

Das Klimasystem der Erde ist ein komplexes Zusammenspiel verschiedener Elemente, von Atmosphäre, Biosphäre, Landmassen, Ozeanen und Eismassen. Die einzelnen Komponenten tauschen ständig Energie untereinander aus. Dadurch schwanken typische Zirkulationsmuster in der Atmosphäre und den Ozeanen, wie die Hadleyzirkulation, die Westwindgürtel und die Subpolarwirbel auf Zeitskalen von Tagen bis zu Jahrhunderten in ihrer Intensität.



Durch die Verstärkung des Treibhauseffekts durch die Menschen ist im gesamten Klimasystem der Erde zusätzliche Energie vorhanden. Nur rund ein Prozent dieser Überschuss-Energie verbleibt im Mittel in der Lufthülle der Erde, etwa 93 Prozent reichert sich in den Weltmeeren an.[10] So kann durchaus die Temperatur der Atmosphäre stagnieren oder gar abnehmen (wie es immer mal wieder und auch über einige Jahre hinweg vorkommt), während gleichzeitig die Temperatur der Ozeane weiter ansteigt. Der Wärmeinhalt der Ozeane ist damit ein besserer Indikator für die Klimaerwärmung als die stärker und kurzfristiger schwankende Lufttemperatur.

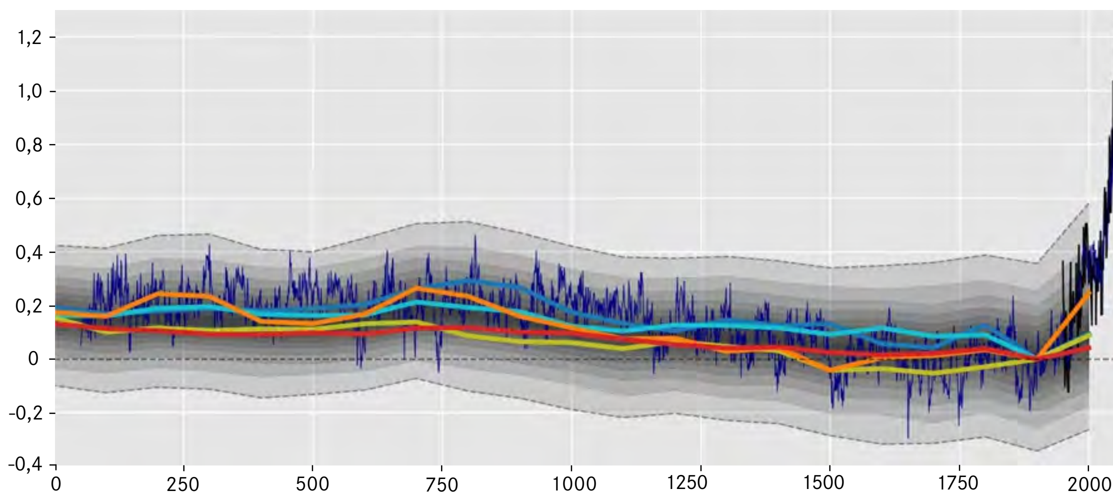
Durch die internen Wechselwirkungen im Klimasystem entstehen im globalen Mittel in der Regel nur Schwankungen der Lufttemperatur von wenigen Zehntelgrad. Diese kurzfristigen Schwankungen wie

auch natürliche äußere Klimaeinflüsse (siehe Punkt 4) überlagern den langfristigen Erwärmungstrend infolge des anthropogenen Ausstoßes von Treibhausgasen. Die Kurve der globalen Mitteltemperatur ist deshalb eine ansteigende Zickzack-Linie.

4. URSACHEN VON KLIMAÄNDERUNGEN – ÄUSSERE EINFLÜSSE

Das Klima hat sich über die Jahrmillionen der Erdgeschichte vielfach verändert. Die wesentlichen Ursachen dafür sind wissenschaftlich weitgehend geklärt. Erdgeschichtliche Warm- und Kaltzeiten wurden vor allem hervorgerufen durch die Änderungen der Erdbahn um die Sonne oder der Rotationsachse der Erde, Erdbahnparameter genannt, und durch die Verschiebung von Kontinenten. Die dadurch verursachten Veränderungen der globalen Temperatur laufen allerdings im Vergleich zur aktuellen Erwärmung extrem langsam ab – der kürzeste der Erdbahnparameterzyklen beispielsweise hat eine Dauer von 23.000 Jahren.

ENTWICKLUNG DER GLOBALEN MITTELTEMPERATUR



Originalgrafik: https://doi.org/10.1038/s41597-020-0530-7

Rekonstruierte mittlere Jahrestemperaturen der letzten 2000 Jahre. Die farbigen Linien zeigen die Mittelwerte verschiedener Rekonstruktionsmethoden. Die schwarze Linie zeigt die Messdaten für 1900 - 2010.

Erkenntnisse über das Klima der Vergangenheit (dieser Forschungszweig heißt „Paläoklimatologie“) werden durch Auswertung natürlicher Klimaarchive wie beispielsweise Sedimentablagerungen am Grund von Ozeanen und Seen gewonnen. Bohrungen auf Grönland und der Antarktis fördern Eis zutage, das Luftbläschen aus der Atmosphäre enthält, die bis zu 800.000 Jahre alt sind. So können bis weit in die Vergangenheit die Konzentrationen von Treibhausgasen in der Atmosphäre und die Temperaturen rekonstruiert werden. Dabei stellt sich unter anderem heraus, dass sich die historischen Klimaschwankungen nur erklären lassen, wenn man auch die Änderungen des Treibhauseffekts mit einbezieht. Über die jüngere Vergangenheit geben Baumringe oder Korallen Auskunft.[11]

Die vielfältigen Forschungen haben natürliche Ursachen für den aktuellen, sehr steilen Temperaturanstieg seit Beginn der Industrialisierung ausgeschlossen. Er ist nur durch die menschengemachte Verstärkung des Treibhauseffekts erklärbar.[12]

Die Sonne beispielsweise kann nicht die Ursache der globalen Erwärmung sein, denn seit etwa 50 Jahren nimmt ihre Leuchtkraft leicht ab – während in diesem Zeitraum der stärkste Temperaturanstieg

gemessen wurde.[13] Selbst ein künftiges absolutes Aktivitätsminimum der Sonne wie während der Kleinen Eiszeit würde wenig am Klimawandel ändern: In einem solchen (hypothetischen) Fall würde sich die Erdmitteltemperatur nur um wenige Hundertstel- oder Zehntelgrad verringern – doch der Anstieg gegenüber der vorindustriellen Zeit beträgt bereits jetzt etwa 1,2 °C.[14]

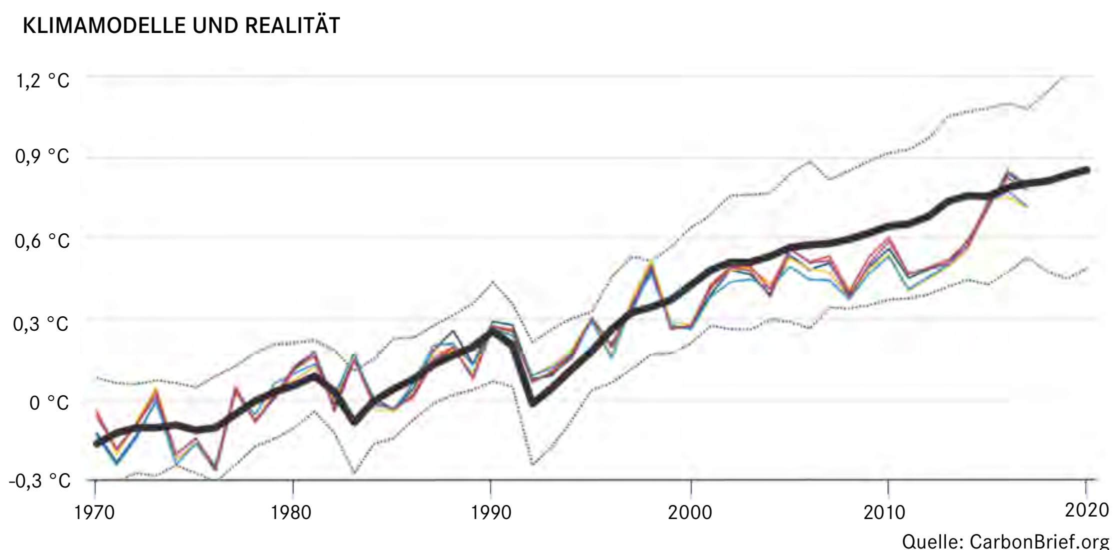
Ein weiterer natürlicher Klimafaktor sind Vulkanausbrüche. Dabei gelangen Schwefelgase in die Atmosphäre, aus denen dort Schwefelteilchen entstehen – sogenannte Aerosole. Diese reflektieren einen Teil des Sonnenlichts, was zu einer gewissen Abkühlung der Erde führt. Dieser Effekt hält aber nur wenige Jahre an. Der bisher letzte klimawirksame Vulkanausbruch war der Ausbruch des Pinatubo auf den Philippinen im Jahr 1991. Auch Vulkanaktivität hat deshalb keinen signifikanten Einfluss auf die aktuelle globale Erwärmung.[15] Allerdings lässt sich nicht vorhersagen, wann in Zukunft mit welchen Vulkanausbrüchen gerechnet werden muss. Es ist wahrscheinlich, dass im Laufe dieses Jahrhunderts mindestens einmal eine kurzfristige Abkühlung wie nach dem Ausbruch des Pinatubo 1991 zu erwarten ist.

5. KLIMAMODELLE

Ein wichtiger Erkenntnisweg in den Naturwissenschaften besteht darin, komplexe Prozesse dadurch zu verstehen, dass man sie in Computermodellen quantitativ nachrechnet, auf Basis der physikalischen Grundgesetze. In den vergangenen Jahrzehnten hat die Klimaforschung immer detailliertere Modelle des Klimasystems der Erde entwickelt. Diese haben bereits in den 1970er und 1980er Jahren die derzeit ablaufende Erwärmung verlässlich vorhergesagt.

Der weltweite Temperaturanstieg bewegt sich heute in dem Korridor, den der Weltklimarat (IPCC) in seinem ersten Sachstandsbericht bereits 1990 erwartet hat. Auch andere Aussagen früherer Klimamodelle wurden später durch die Realität bestätigt, zum Beispiel zu Gletscherschmelze, Meeresspiegelanstieg oder der Zunahme von Dürren.[16]

KLIMAMODELLE UND REALITÄT



Quelle: CarbonBrief.org

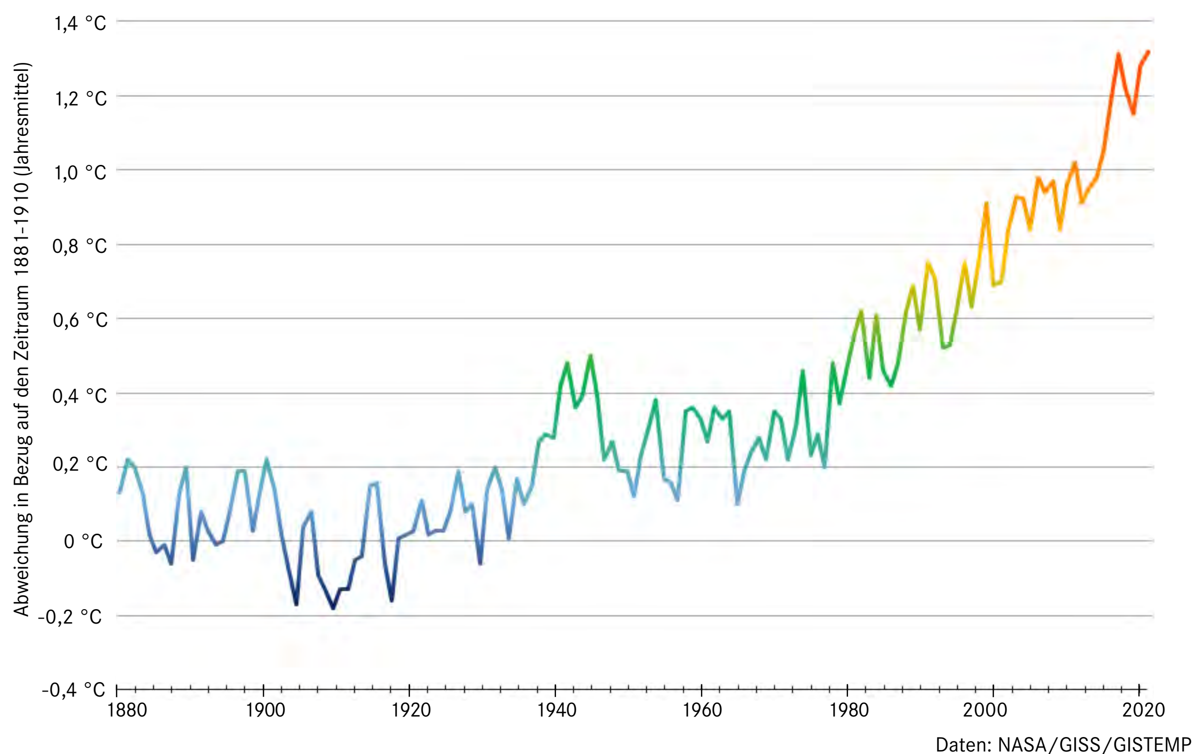
Moderne Klimamodelle können vergangene und künftige Klimaentwicklungen zutreffend abbilden. Die schwarze Linie zeigt den Mittelwert von Klimaprojektionen durch Modelle der CMIP5-Generationen, die Basis des Fünften Sachstandsberichts des IPCC von 2013/2014 waren. Die grauen Linien markieren den oberen und unteren Streubereich. Die farbigen Linien zeigen die reale Temperaturentwicklung (in fünf verschiedenen globalen Datensätzen).

In der Forschung werden meist sehr viele Rechendurchläufe mit einem Klimamodell durchgeführt und auch verschiedene Modelle herangezogen. Aus der Summe der Ergebnisse werden Mittelwerte abgeleitet sowie Spannbreiten berechnet. Um die Grenzen von Klimamodellen transparent zu machen, wird in der Wissenschaft ausdrücklich nicht von Klima"prognosen" gesprochen, sondern von Klima"projektionen", da jede Modelsimulation künftiger Entwicklungen auf bestimmten Annahmen fußt, so beispielsweise auf Annahmen über die zukünftigen Emissionen von Treibhausgasen. Diese sind kaum vorhersagbar, weil durch die Menschen und ihr Verhalten beeinflusst. Klimaprojektionen stellen Wenn-Dann-Beziehungen her, die Aussagen über die Wirkung von Einflüssen auf das Klimasystem erlauben.[17]

Moderne Klimamodelle vermögen, beobachtete Klimaentwicklungen der Vergangenheit zutreffend abzubilden. Deshalb sind Schlussfolgerungen für die künftige Klimaentwicklung, die wir heute aus den Ergebnissen von Modellrechnungen ziehen können, eine verlässliche Grundlage für politische Entscheidungen.[18]

GLOBALER KLIMAWANDEL

6. WELTWEITE ERWÄRMUNG



Alle Komponenten des Klimasystems, also Ozean, Land, Atmosphäre, Biosphäre und Eismassen, haben sich in den vergangenen Jahrzehnten deutlich erwärmt – und diese Erwärmung fand praktisch überall auf der Erde statt. Eine Ausnahme, die Abkühlung des subpolaren Atlantiks, wurde von Klimamodellen seit langem vorhergesagt und geht offenbar auf eine Abschwächung des Golfstromsystems zurück.[19] Eine weitere Ausnahme ist die leichte Abkühlung im Süd-Ozean, deren Ursache noch ungeklärt ist. Das rasante Tempo und die weltweite Gleichzeitigkeit des Temperaturanstieges unterscheiden den heutigen menschengemachten Klimawandel von vorherigen natürlichen Veränderungen wie den Eiszeit-Warmzeit-Zyklen, der sogenannten Mittelalterlichen Warmzeit oder Kleinen Eiszeit.[20]

Die Luft an der Erdoberfläche hat sich gegenüber der vorindustriellen Zeit im globalen Mittel bereits um über 1 °C erwärmt.[21] Ein solches Temperaturniveau gab es laut den verfügbaren paläoklimatischen Daten noch nie während der vergangenen 2.000 Jahre und sehr wahrscheinlich auch nie während der gegenwärtigen Warmzeit (dem Holozän), die vor knapp 12.000 Jahren begann – also noch nie im Laufe der Geschichte des modernen Menschen.[22]

7. BEISPIELLOSE HÄUFUNG VON REKORDEN

Seit den 1980er Jahren war jede Dekade wärmer als die vorherige und wärmer als alle vorangegangenen Jahrzehnte seit 1850.[23] Auch die Dekade 2011 bis 2020 hat einen neuen Höchststand markiert. Alle zehn wärmsten Jahre seit Beginn der Aufzeichnungen traten seit 2005 auf (siehe Kasten).[24] 2020 war nach Daten der US-Behörde NOAA weltweit das zweitwärmste Jahr seit Beginn der Aufzeichnungen und bereits das 44. Jahr in Folge, in dem die Mitteltemperatur an der Erdoberfläche über dem Durchschnitt des 20. Jahrhunderts lag.[25] Nach Angaben des EU-Erdbeobachtungsprogramms „Copernicus"[26] und der US-Behörde NASA[27] ist 2020 sogar das weltweit wärmste Jahr seit Beginn der Aufzeichnungen, gemeinsam mit 2016.

DIE WÄRMSTEN JAHRE WELTWEIT (SEIT BEGINN DER AUFZEICHNUNGEN)

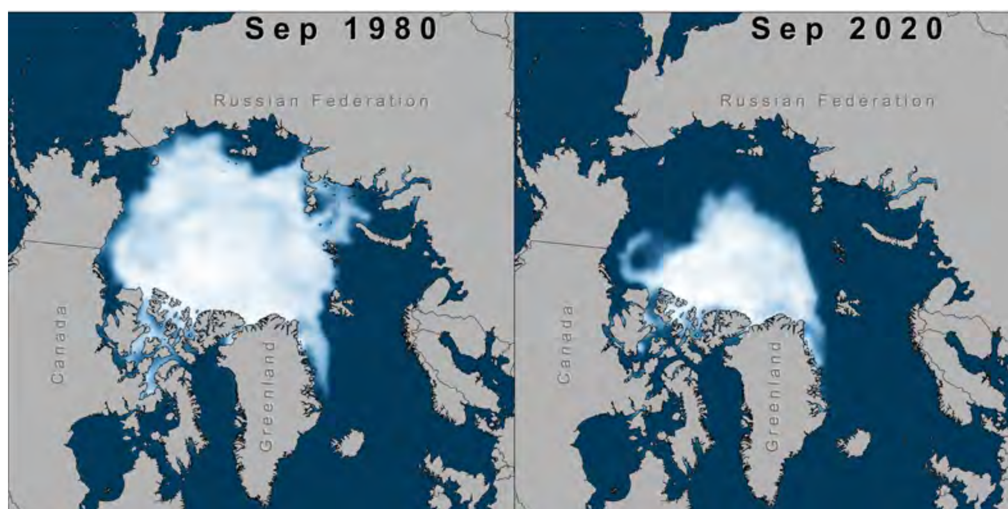
JAHR	ABWEICHUNG (in Bezug auf 1881-1910)
2020	+1,28°C
2016	+1,27 °C
2019	+1,24 °C
2017	+1,18 °C
2015	+1,16 °C
2018	+1,11 °C
2014	+1,01 °C
2010	+0,98 °C
2013, 2005	+0,94 °C
2007	+0,93 °C

Quelle: NASA/GISS/GISTEMP

8. DAS ARKTISCHE MEEREIS SCHWINDET

Das Meereis rund um den Nordpol schrumpft. Sowohl das Eisvolumen in der Arktis als auch die dort mit Eis bedeckte Ozeanfläche (die Maximalausdehnung am Ende des Winters ebenso wie das Minimum am Ende des Sommers) sind seit Beginn der Satellitenmessungen 1979 stetig zurückgegangen – um durchschnittlich mehr als zehn Prozent pro Dekade. Betrug die Ausdehnung des arktischen Meereises zwischen 1979 und 1992 noch rund 6,1 Millionen Quadratkilometer, so lag dieser Wert im Zeitraum 2007 bis 2020 nur noch bei rund 4,4 Millionen Quadratkilometern.[28] Sehr stark schwindet das mehrjährige und damit besonders dicke Eis, weshalb die verbleibende Eisfläche zusehends empfindlicher auf die Erwärmung reagiert.[29]

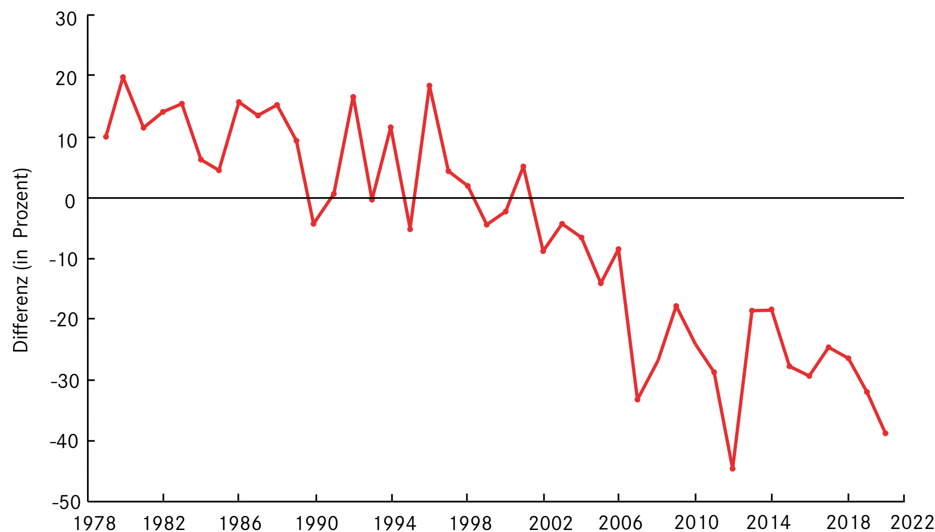
MEEREISFLÄCHE IM POLARMEER



Grafik: Roessler, Team Polar and Cold Regions (DLR-EOC)

Gegenüberstellung der monatlichen Mittelwerte der Eisbedeckung im September 1980 und 2020. Das Meereis im Nordpolarmeer erreicht im September sein jährliches Minimum.

Herausgegeben von:
Deutsches Klima-Konsortium, Deutsche Meteorologische Gesellschaft, Deutscher Wetterdienst, Extremwetterkongress Hamburg, Helmholtz-Klima-Initiative, klimafakten.de

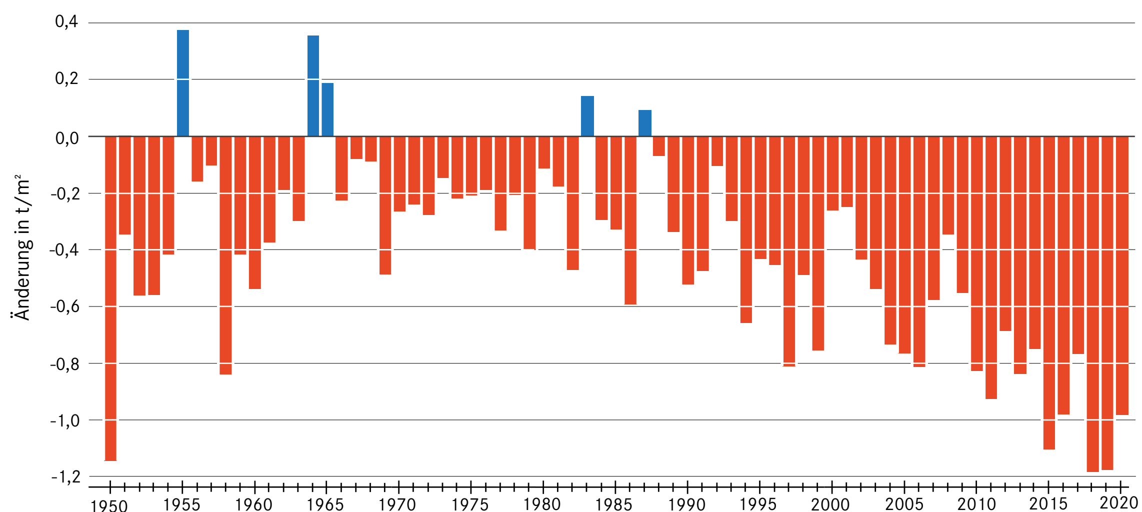


Quelle: NOAA, Arctic Report Card 2020

Am Südpol zeigt die Ausdehnung des Meereises rings um den antarktischen Kontinent für den Zeitraum seit 1979 keinen statistisch signifikanten Trend. In den letzten Jahren wurden Rückgänge beobachtet, aber gesicherte Aussagen sind noch nicht möglich.[30]

9. FESTLAND-EIS UND SCHNEEDECKE SCHRUMPFEN

Die Eismasse auf Grönland schwindet jedes Jahr um mehr als 250 Milliarden Tonnen. Dies trägt seit 2006 mit mehr als 7 Millimetern pro Jahrzehnt zum Anstieg der durchschnittlichen globalen Meeresspiegelhöhe bei.[31] Das Tempo des Eisverlusts auf Grönland hat sich in den vergangenen Jahren stark beschleunigt. Zwischen 1981 und 2010 schmolz es im Juni und Juli an rund 15 Prozent der grönländischen Eisoberfläche, im Juni und Juli 2020 bereits an rund 25 Prozent.[32] Teile des antarktischen Eispanzers zeigen ebenfalls starke Verluste, dort gehen seit 2006 etwa 150 Milliarden Tonnen Eismasse pro Jahr verloren (Beitrag zum Meeresspiegelanstieg: rund 4 Millimeter pro Jahrzehnt).[33]



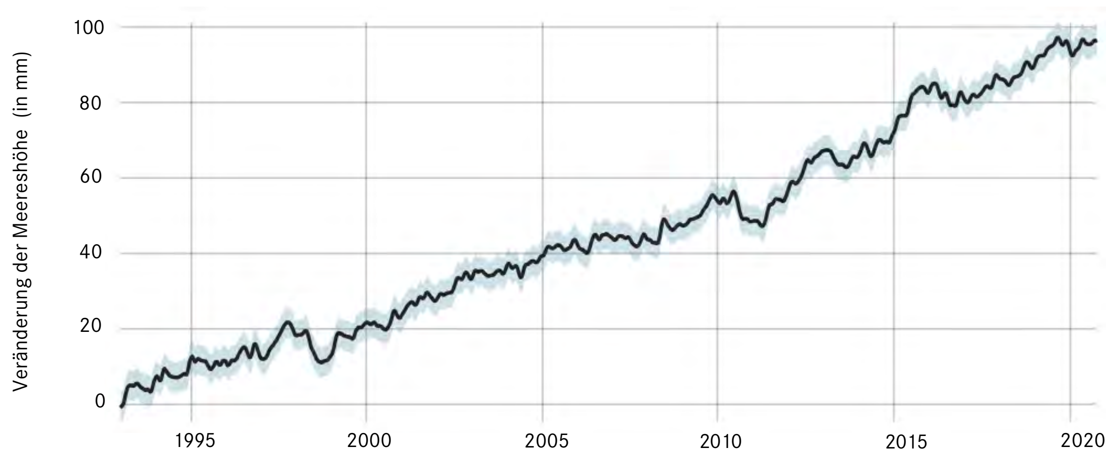
Daten: World Glacier Monitoring Service

Auch die meisten Gebirgsgletscher schrumpfen. Obwohl einige wenige Gletscher aufgrund regionaler Besonderheiten wachsen, hat die globale Gesamtmasse der Gebirgsgletscher seit 1980 deutlich abgenommen – im Durchschnitt verschwand seitdem eine Eisschicht von mehr als 20 Metern Dicke.[34] Eine derartige Entwicklung, so Glaziologen, hat es seit Beginn der Aufzeichnungen noch nie gegeben.[35] Während ein Teil des Gletscherschwunds noch eine Nachwirkung der Erwärmung im Anschluss an die Kleine Eiszeit auf der Nordhalbkugel zwischen dem 15. und dem 19. Jahrhundert sein dürfte, ist seit einigen Jahrzehnten der menschengemachte Klimawandel die Hauptursache.[36] Auch die Dauer der Schneebedeckung ist in vielen Regionen in den vergangenen Jahrzehnten deutlich zurückgegangen.[37]

10. DER MEERESSPIEGEL STEIGT – UND ZWAR IMMER SCHNELLER

Laut IPCC sind die Meeresspiegel zwischen 1902 und 2015 im weltweiten Durchschnitt bereits um rund 16 Zentimeter gestiegen, allein seit Beginn globaler Messungen per Satellit 1993 um etwa zehn Zentimeter.[38] Seit 2006 beträgt die Anstiegsrate jährlich rund 3,6 Millimeter (also rund 3,6 Zentimeter pro Jahrzehnt), mehr als doppelt so viel wie zuvor. Ursache dieser Beschleunigung ist die immer stärkere Schmelze der Eispanzer in Grönland und der Antarktis.[39]

MEERESSPIEGELANSTIEG



Quelle: NASA Goddard Space Flight Center

Allerdings steigen die Pegel an den Küsten der Welt nicht überall gleich stark, es gibt regionale Abweichungen von bis zu plus oder minus 30 Prozent.[40] Ursache für die Unterschiede sind zum Beispiel Landmassen unter Deltas oder Städten, die stark absinken, ausgelöst durch menschliches Handeln wie zum Beispiel durch das Abpumpen von Grundwasser, die Öl- und Gasförderung oder durch Sedimentverschiebungen. Etwa 58 Prozent der Weltküstenbevölkerung, die an oder auf absinkenden Deltas lebt, ist davon betroffen. Dort stieg der Meeresspiegel in den vergangenen 20 Jahren durchschnittlich sogar 7,8 mm bis 9,9 mm pro Jahr.[41]

11. OZEANE VERSAUERN, KORALLEN STERBEN

Der Säuregrad von Flüssigkeiten wird durch den pH-Wert angegeben – je kleiner der pH-Wert, desto saurer die Flüssigkeit. Der pH-Wert des oberflächennahen Meerwassers liegt aktuell im weltweiten Mittel bei etwa 8,1 und ist gegenüber der vorindustriellen Zeit bereits um rund 0,1 gesunken. Diese Veränderung mag gering klingen, bedeutet jedoch (weil die pH-Skala logarithmisch ist) eine Zunahme des Säuregrades um 26 Prozent. Die Entwicklung bedroht unter anderem zahlreiche kalkbildende Meereslebewesen wie Korallen, Muscheln oder Krebse.[42]

Grund dieser sogenannten „Versauerung" der Meere sind die vom Menschen verursachten Emissionen von Kohlendioxid; seit den 1980er Jahren haben die Ozeane etwa 20 bis 30 Prozent davon aufgenommen.[43] Wenn sich CO_2 in Meerwasser löst, reagiert es mit Wasser und bildet Kohlensäure. Sinkt der menschengemachte Ausstoß von Kohlendioxid nicht, könnte der pH-Wert bis Ende des Jahrhunderts auf Werte fallen, wie sie seit mehr als 50 Millionen Jahren nicht mehr in den Ozeanen vorkamen.[44] Korallen leiden außerdem sehr stark unter den steigenden Temperaturen des Meerwassers.[45]

12. WETTEREXTREME NEHMEN ZU

Bestimmte Typen von Extremwetter-Ereignissen haben weltweit deutlich zugenommen. Die bereits beobachtete Erwärmung hat in den meisten Gebieten an Land bereits zu einer erhöhten Häufigkeit, Intensität und Dauer von Hitzewellen geführt. In manchen Gegenden sind auch Dürren häufiger und heftiger geworden, etwa im Mittelmeerraum, in Westasien, vielen Teilen Südamerikas sowie einem Großteil Afrikas und Nordostasiens. Zudem wurden lokale Starkniederschläge weltweit noch intensiver.[46] In Nordwest-Europa hat in den vergangenen Jahrzehnten das Risiko von Flusshochwassern zugenommen.[47] Bei tropischen Wirbelstürmen stieg zwar nicht die Gesamtzahl, wohl aber sind die stärksten von ihnen häufiger geworden: Der Anteil der von Satelliten bestimmten Hurrikane der stärksten Kategorien 3, 4 und 5 an allen Hurrikanen stieg von 1979 bis 2017 um ein Viertel, von 32 Prozent auf 40 Prozent.[48]

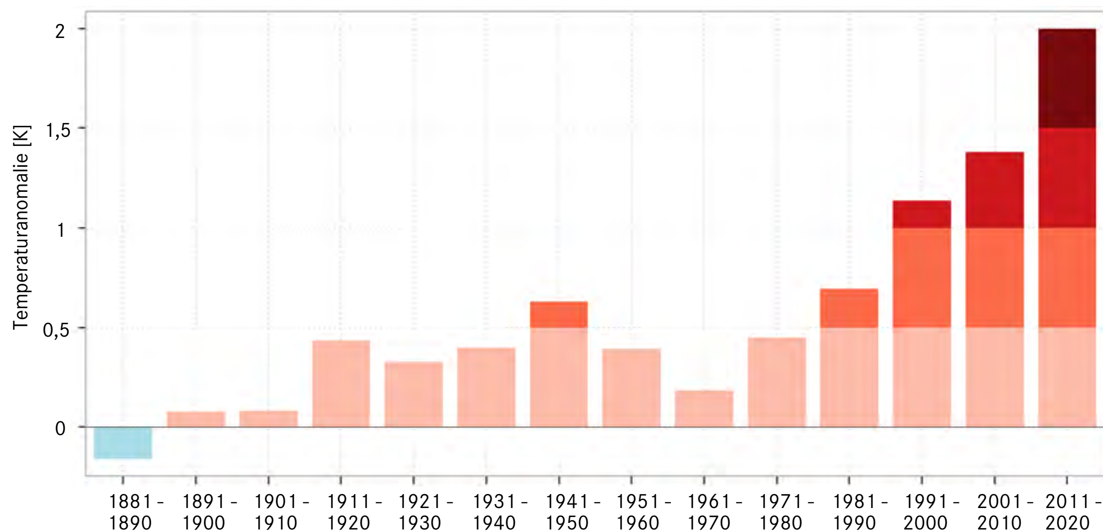
Der Temperaturanstieg, veränderte Niederschlagsmuster und die Zunahme mancher Wetterextreme beeinträchtigen bereits die Sicherheit der Lebensmittelversorgung: In vielen äquatornahen Regionen sind die Erträge etwa von Mais und Weizen gesunken (in Regionen höherer Breiten dagegen gab es bessere Ernten). In Afrika schadet der Klimawandel bereits der Viehzucht. Vielerorts bekommt die Landwirtschaft größere Probleme durch Schädlingsbefall von Pflanzen.[49]

KLIMAWANDEL IN DEUTSCHLAND

13. BEREITS 2 °C ERWÄRMUNG – DEUTLICH MEHR ALS DER WELTWEITE DURCHSCHNITT

Seit Beginn der systematischen, flächendeckenden Wetteraufzeichnungen 1881 hat sich die mittlere Temperatur der bodennahen Luft in Deutschland bereits deutlich erhöht. Laut Daten des Deutschen Wetterdienstes war das zurückliegende Jahrzehnt (2011-2020) rund 2 °C wärmer als die ersten Jahrzehnte (1881-1910) der Aufzeichnungen. Die Temperaturen in Deutschland sind damit deutlich stärker gestiegen als im weltweiten Durchschnitt.[50]

Das Tempo des Temperaturanstiegs hat in Deutschland (wie auch weltweit) in den vergangenen 50 Jahren deutlich zugenommen: Über den Gesamtzeitraum 1881-2020 gerechnet wurde es im Mittel um 0,12 °C pro Dekade wärmer, für die letzten 50 Jahre (1971-2020) lag die Erwärmungsrate mit 0,38 °C pro Dekade mehr als dreimal so hoch. Seit den 1960er Jahren war hierzulande jedes Jahrzehnt deutlich wärmer als das vorherige.[51]



DIE WÄRMSTEN JAHRE IN DEUTSCHLAND
(SEIT BEGINN DER AUFZEICHNUNGEN)

JAHR	ABWEICHUNG (in Bezug auf 1881-1910)
2018	+2,7 °C
2020	+2,6 °C
2019	+2,5 °C
2014	+2,5 °C
2015	+2,1 °C
2007	+2,1 °C
2000	+2,1 °C
1994	+1,9 °C
2017	+1,8 °C
2011	+1,8 °C

Quelle: DWD

14. BEISPIELLOSE HÄUFUNG VON WÄRME-REKORDJAHREN

Neun der zehn wärmsten Jahre seit 1881 in Deutschland sind nach dem Jahr 2000 aufgetreten (siehe Kasten). Sieben Jahre waren bereits mehr als 2 °C wärmer als der langjährige Durchschnitt zu Beginn der Aufzeichnungen (1881-1910), vier Jahre sogar 2,5 °C oder mehr.[52] Eine derart außergewöhnliche Häufung von Rekordjahren der Temperatur ist nur durch die menschengemachte globale Erwärmung erklärbar; statistische Zufälle oder natürliche Ursachen (interne Schwankungen im Klimasystem oder natürliche Einflüsse von außen) fallen als Erklärung aus.[53]

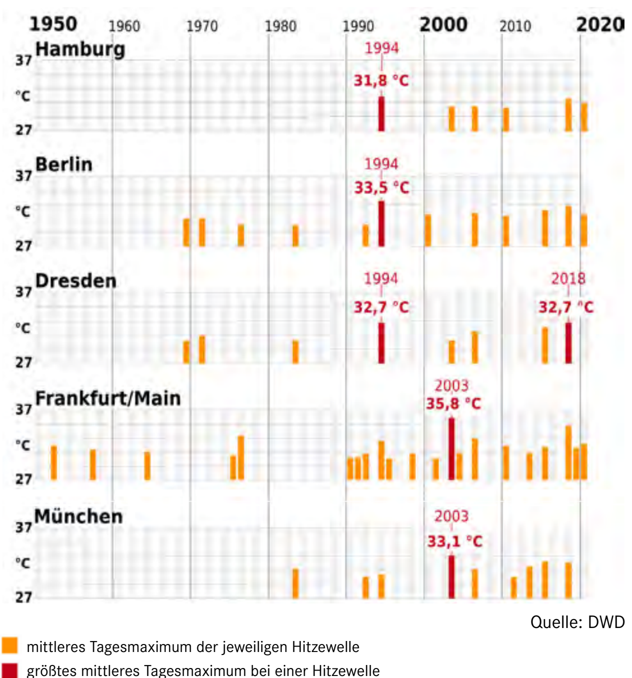
15. MEHR HITZE, WENIGER FROST

In den 1950er Jahren (1951-1960) gab es im bundesweiten Mittel pro Jahr etwa 3,5 sogenannte „Heiße Tage“ (so bezeichnen Meteorologen Tage, an denen die Temperatur auf 30 °C oder höher steigt). Im Zeitraum 1991-2020 war die Anzahl „Heißer Tage“ bereits durchschnittlich 8,9 Tage pro Jahr. Demgegenüber nahm die mittlere Zahl der sogenannten „Eistage“ (Tage, an denen die Temperatur den ganzen Tag unter 0 °C bleibt) im gleichen Zeitraum von 28 auf 19 Tage pro Jahr ab.[54] In Hamburg zum Beispiel gab es im Winter 2019/2020 erstmals seit Aufzeichnungsbeginn keinen einzigen Eistag.[55]

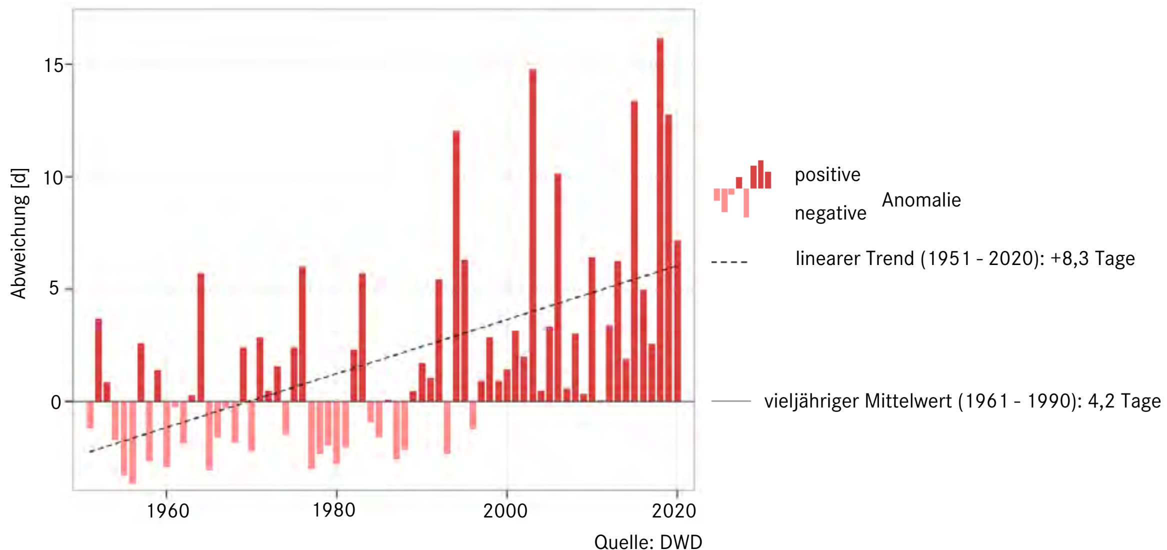
Auch die Häufigkeit und Intensität von Hitzewellen in Deutschland hat sich verändert, in vielen Regionen kommt es seit den 1990er Jahren zu einer massiven Häufung. 14-tägige Hitzeperioden mit einem mittleren Tagesmaximum der Lufttemperatur von mindestens 30 °C traten zum Beispiel in Hamburg vor 1994 überhaupt nicht auf – danach gab es dort allerdings schon sechs. Bei ungebremstem Treibhausgasausstoß wird für den Zeitraum 2021 bis 2050 eine weitere Zunahme um fünf bis zehn Heiße Tage in Norddeutschland und um zehn bis 15 Heiße Tage in Süddeutschland erwartet.[56]

MARKANTE HITZEWELLEN SEIT 1951

14-tägige Hitzeperioden mit einem mittleren Tagesmaximum der Lufttemperatur von mindestens 30 °C für ausgewählte Städte



Quelle: DWD



16. MEHR STARKREGEN — UND ZUGLEICH LÄNGERE TROCKENZEITEN

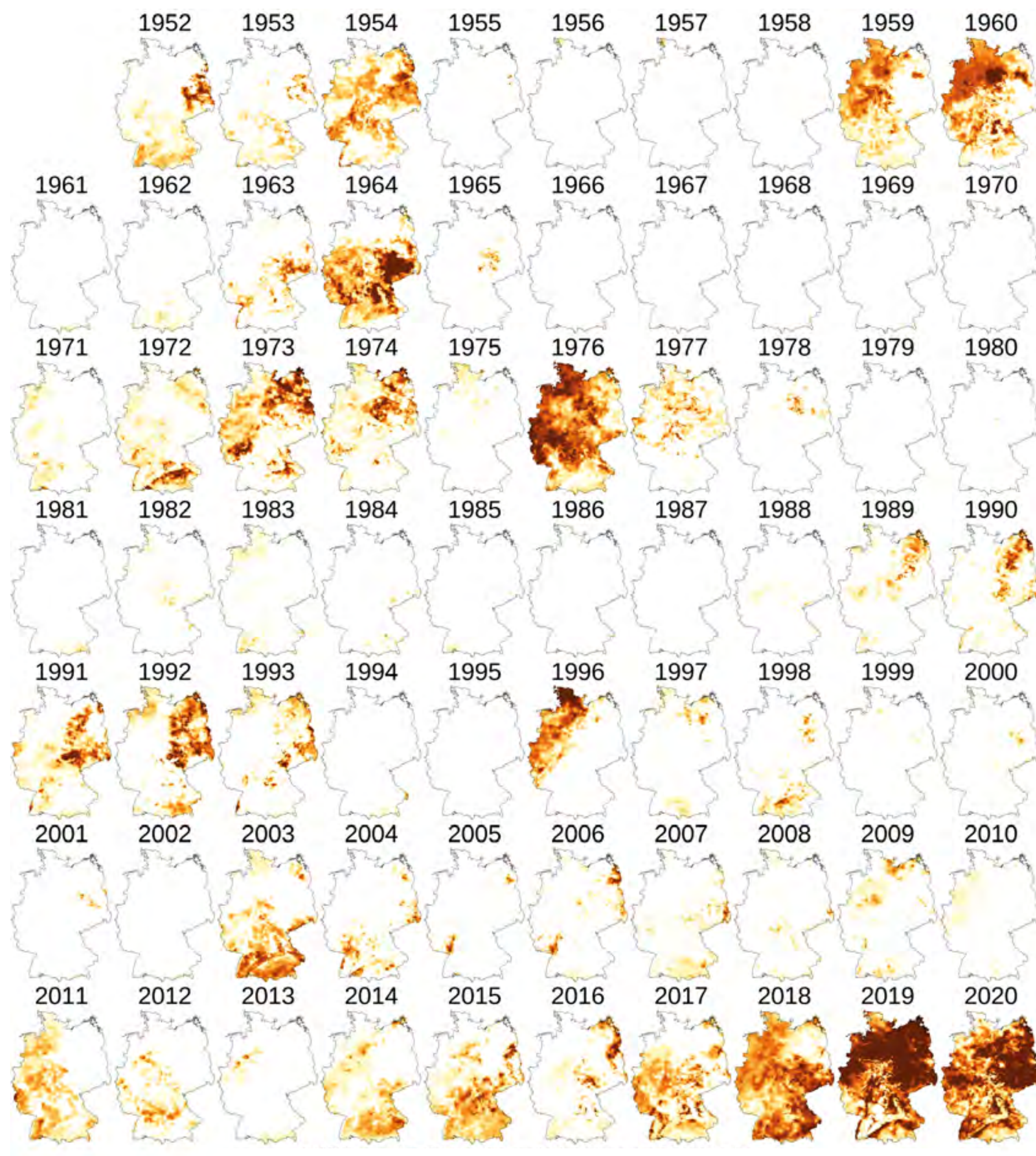
Eine mögliche Folge des Klimawandels in Deutschland ist die Zunahme von Starkregenereignissen.[57] Zumindest die Daten der flächendeckenden Regenradare des DWD liefern erste Indizien für eine Zunahme; weil diese Datenreihe aber noch zu kurz ist, kann die Zunahme noch nicht statistisch gesichert nachgewiesen werden. Eine Zunahme entspräche auch dem physikalischen Grundverständnis, wonach die erhöhte Wasserdampfaufnahme der Atmosphäre durch die globale Erwärmung konvektive Niederschläge verstärken könnte. Es gibt auch Hinweise, dass im Sommer die Zahl aufeinanderfolgender Trockentage zunehmen könnte. Beide Tendenzen hätten zur Folge, dass sich hydroklimatische Gefahren wie Dürren und Überschwemmungen erhöhten.[58] Zumindest der Trend zu intensiveren Starkregenereignissen wird auch für die Zukunft prognostiziert.[59] Die bodennahe relative Feuchte hat abgenommen und wird weiter abnehmen, so dass auch bei gleichbleibenden Niederschlägen der Boden vermehrt austrocknet.[60] Laut Daten des DWD hat die Zahl von Tagen mit niedriger Bodenfeuchte seit 1961 bereits deutlich zugenommen; besonders betroffen von der zunehmenden Bodentrockenheit sind der Nordosten sowie das Rhein-Main-Gebiet.[61]

Auch wenn es bislang keinen eindeutigen Nachweis dafür gibt, dass verminderte Niederschläge über Deutschland mit dem anthropogenen Klimawandel zusammenhängen, ist es bemerkenswert, dass die trockenen Jahre 2018, 2019 und 2020 beispiellos für die vergangenen 250 Jahre waren. Seit 1766 hat es in Mitteleuropa keine dreijährige Sommer-Dürre dieses Ausmaßes gegeben; mehr als 50 Prozent des Ackerlandes waren davon betroffen.[62] Diese extrem ungewöhnliche Trockenheit setzte sich in vielen Regionen auch 2020 fort. Der Dürremonitor des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung in Leipzig zeigt, dass der Gesamtboden in weiten Teilen Deutschlands das vierte Trockenjahr in Folge während der Vegetationsperiode erlebt.[63]

Zahlreiche Wirtschaftsbranchen bekommen die Auswirkungen von Dürren zu spüren, etwa Energieerzeugung und Industrie.[64] Während der extrem trockenen Jahre 2018 und 2019 sanken zum Beispiel die Wasserstände von Rhein und Elbe so stark, dass Binnenschiffe über Wochen oder gar Monate nur eingeschränkt oder gar nicht fahren konnten. Wegen der Verkehrseinschränkungen mussten am Rhein zum Beispiel Raffinerien und Chemiewerke ihre Produktion reduzieren.[65] Weil es an

Kühlwasser mangelte, wurden Kohle- und Atomkraftwerke zeitweise in ihrer Leistung gedrosselt.[66] Die wirtschaftlichen Schäden für die betroffenen Branchen betrugen hunderte Millionen von Euro.[67]

JÄHRLICHE DÜRRESTÄRKE IM GESAMTBODEN 1952-2020 IN DEUTSCHLAND



Grafik: UFZ-Dürremonitor/Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Friedrich Boeing

Dürrestärken in der Vegetationsperiode April bis Oktober für die Jahre 1952 bis 2020 im Gesamtboden bis zu einer Tiefe von ca. 1,80 Meter. In die Berechnung fließt die Länge der Dürreperiode und die absolute Trockenheit im zeitlichen Verlauf ein.

Geht der Klimawandel ungebremst weiter, wird mit einer starken Risikozunahme in Bezug auf agrarische und hydrologische Dürre und deren Folgen gerechnet. Eine globale Erwärmung um weitere 3 °C würde zum Beispiel für Teile Südwestdeutschlands gegenüber dem Zeitraum 1971 bis 2000 eine Verdoppelung der Zeiten unter Dürre bedeuten, in Deutschland wären die Niedrigwasser flächendeckend stärker ausgeprägt.[68]

17. PFLANZEN UND TIERE REAGIEREN SENSIBEL AUF DIE ERWÄRMUNG

Weltweit hat der Temperaturanstieg bereits zu einer Verschiebung von Klimazonen geführt und damit zu teils tiefgreifenden Veränderungen der Verbreitungsgebiete von Pflanzen und Tieren.[69] Auch in Deutschland ist schon zu beobachten, dass sich verschiedene Pflanzen in neue Regionen ausbreiten, etwa das ursprünglich aus dem Mittelmeerraum stammende Affen-Knabenkraut nach Norden oder die schon länger im Westen Deutschlands heimische Stechpalme nach Norden und Osten. Dasselbe ist auch bei krankheitsübertragenden Insekten wie der Asiatischen Tigermücke zu beobachten. Der Klimawandel verändert zudem Entwicklungsphasen von und Wechselbeziehungen zwischen Organismen: Zugvögel kommen früher zurück, bei Fischen wurde eine frühere Laichzeit nachgewiesen. Blühzeitpunkte von Pflanzen verschieben sich, sodass sie nicht mehr zum Lebenszyklus der sie bestäubenden Insekten passen.[70]

AUSWIRKUNGEN KLIMAWANDEL DEUTSCHLAND



ZUGVÖGEL
· kommen früher zurück
· Eiablage beginnt früher
· Verhaltensmuster verändern sich

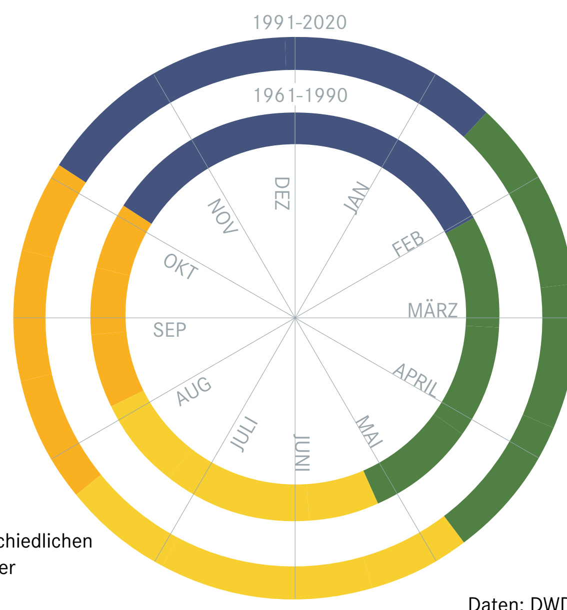


PFLANZEN
· Hohe Temperaturen und Wärme verlängern die Vegetationsperiode: Pflanzen fangen früher an zu blühen
· Lebensrhythmen von Pflanzen und bestäubenden Insekten verändern sich
· früherer Pollenflug, größere Pollenmenge, aggressiver für Allergiker

PHÄNOLOGISCHE JAHRESZEITEN*
· in Deutschland verschieben sich

Länge in Deutschland (in Tagen)

	1961-1990	1991-2020
Winter	120	101
Frühling	96	102
Sommer	90	89
Herbst	59	73



*Phänologische Jahreszeiten beschreiben die unterschiedlichen Entwicklungsstadien von Pflanzen, von der Blüte über das Früchtetragen bis zum Blattfall.

Daten: DWD

Daten des Deutschen Wetterdienstes belegen, wie sich insgesamt die Vegetationsphasen verändert und verschoben haben: Der sogenannte phänologische Frühling beginnt heute im Mittel schon rund zwei Wochen früher als vor einigen Jahrzehnten. Der phänologische Herbst beginnt früher und dauert dadurch länger. Hingegen hat sich der phänologische Winter von durchschnittlich 120 Tagen pro Jahr auf nur noch 101 Tage verkürzt.[71]

Der Klimawandel bedroht auch die Artenvielfalt. Eine Analyse von 500 ausgewählten heimischen Tierarten im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz ergab, dass der Klimawandel für 63 von ihnen ein hohes Risiko darstellt; am stärksten betroffen sind Schmetterlinge, Weichtiere (z. B. Schnecken) und Käfer.[72]

18. LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT LEIDEN BEREITS UNTER DEM KLIMAWANDEL

Im Vergleich zu den 1970er Jahren blühen zum Beispiel Apfelbäume heute rund 13 Tage zeitiger – doch weil es so früh im Jahr nachts häufig noch sehr kalt wird und die Blüten sehr frostempfindlich sind, haben Obstbauern häufiger schwere Frostschäden zu beklagen (wie es etwa im Frühjahr 2017 der Fall war).[73] Die Trockenheit der vergangenen Jahre führte regional zu deutlichen Ernteeinbußen – zum Beispiel lagen im Dürrejahr 2018 die Erträge bei Getreide um 18 Prozent unter dem Mittel, am stärksten betroffen waren Schleswig-Holstein (-31 Prozent), Brandenburg (-27 Prozent) und Sachsen-Anhalt (-26 Prozent).[74] Auch fehlender Frost wird für die Landwirtschaft ein Problem: Viele Ackerkulturen, etwa Winterweizen, brauchen in einer bestimmten Wachstumsphase (dem „Schossen“) einen Kältereiz – fehlt dieser, leiden die Ernten.

Trockenstress durch geringere Sommerniederschläge und durch einen erhöhten Wasserbedarf aufgrund der höheren Temperaturen, die beschleunigte Entwicklung von Schadinsekten und die zunehmende Gefahr von Waldbränden bedrohen die Forstwirtschaft. Das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft schätzt, dass nach den Trockenjahren 2018, 2019, und 2020 bundesweit mindestens 285.000 Hektar Wald wiederaufgeforstet werden müssen – das entspricht mehr als der fünffachen Fläche des Bodensees.[75]

19. DIE WALDBRANDGEFAHR NIMMT ZU

Wärmere Sommer und längere Trockenphasen verstärken das Risiko von Waldbränden. In den vergangenen Jahrzehnten ist die Zahl der Tage mit hoher Waldbrandwarnstufe bereits gestiegen: Deutschlandweit gemittelt gab es im Zeitraum 1961 bis 1990 rund 27 Tage pro Jahr mit hohem oder sehr hohem Waldbrandrisiko. Im Zeitraum 1981 bis 2010 waren es rund 33 Tage pro Jahr, im Zeitraum 1991 bis 2019 schon rund 38 Tage.[76]

20. BINNENSEEN IN DEUTSCHLAND SIND DEUTLICH WÄRMER GEWORDEN

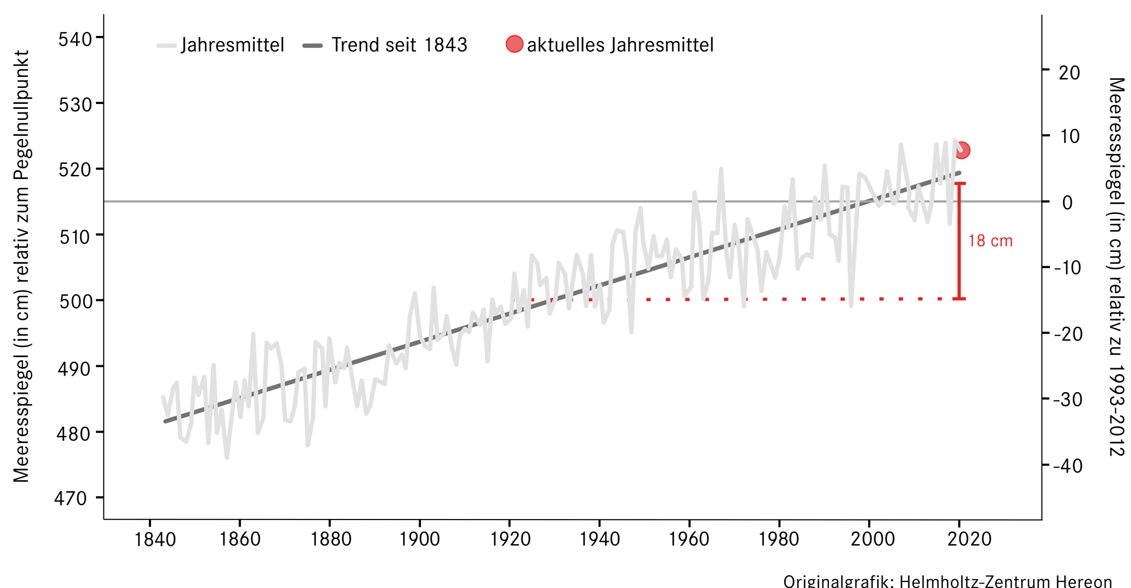
Die Erwärmung betrifft die Seen in den Alpen und im Alpenvorland ebenso wie die Seen in den Mittelgebirgen oder im Norddeutschen Tiefland. Wegen des Temperaturanstiegs verändert sich die Artenvielfalt in den Seen, und es kommt häufiger zu Fischsterben und Algenblüten, die auch für badende Menschen eine Gesundheitsgefahr darstellen können.[77]

21. AUCH DIE TEMPERATUREN VON NORD- UND OSTSEE NEHMEN ZU

Die mittlere Oberflächentemperatur der Nordsee in der Deutschen Bucht hat sich zwischen 1969 und 2017 im Durchschnitt um etwa 1,3 °C erhöht. Vor der deutschen Ostseeküste wurde seit 1982 ein Anstieg der Wassertemperaturen um rund 1,6 °C gemessen. Die genauen Werte variieren je nach Ort und Wassertiefe teils erheblich.[78]

22. DER MEERESSPIEGEL STEIGT AUCH AN DEN DEUTSCHEN KÜSTEN VON NORD- UND OSTSEE

MEERESSPIEGELANSTIEG SEIT 1843
PEGEL CUXHAVEN

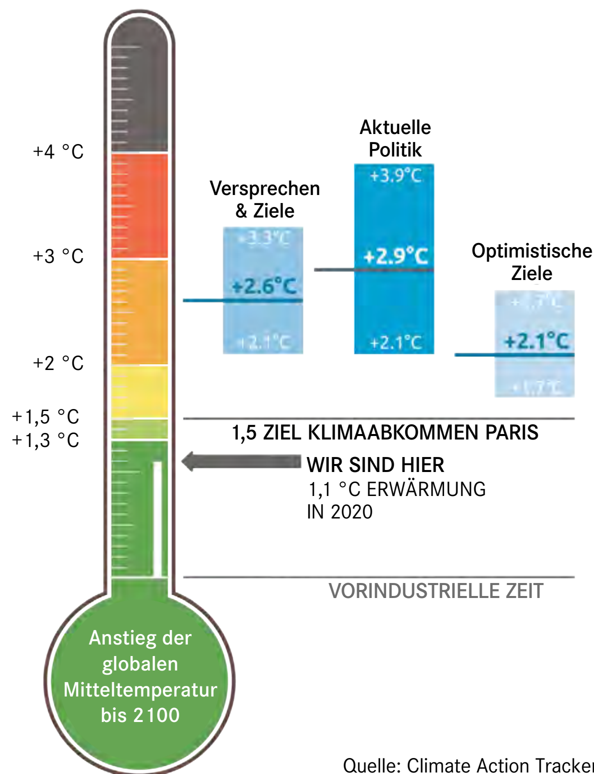


Originalgrafik: Helmholtz-Zentrum Hereon

Der Meeresspiegel am Pegel Cuxhaven zum Beispiel hat seit Mitte des 19. Jahrhunderts bereits um gut 40 Zentimeter zugelegt, am Pegel Travemünde um rund 20 Zentimeter.[79] Allein in den vergangenen hundert Jahren betrug der Anstieg in Cuxhaven im Mittel 18 Zentimeter (siehe Grafik). Folgen sind unter anderem höher auflaufende Sturmfluten. Die weltweit zu beobachtende Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs zeigt sich auch an den deutschen Küsten: Für die Nordsee zum Beispiel wurde für den Gesamtzeitraum 1900 bis 2015 ein Langzeittrend von 1,7 Millimeter jährlicher Zunahme ermittelt; betrachtet man nur den Zeitraum 1992 bis 2015, beträgt der Trend jedoch vier Millimeter pro Jahr.[80]

KÜNFTIGE ENTWICKLUNG

23. DAS 1,5-GRAD-LIMIT WIRD BEI GEGENWÄRTIGER POLITIK VERFEHLT



Quelle: Climate Action Tracker

Bei ungebremsten globalen Emissionen könnte bis Ende des Jahrhunderts die Erwärmung im weltweiten Durchschnitt mehr als 4 °C betragen.[81] Auf dem UN-Klimagipfel von Paris im Jahr 2015 wurde beschlossen, dass der globale Temperaturanstieg auf „deutlich unter 2 °C“ gegenüber vorindustriellem Niveau begrenzt werden soll, möglichst sogar auf 1,5 Grad. Setzt sich der derzeitige Erwärmungstrend fort, so könnte die 1,5 Grad Grenze jedoch bereits in gut einem Jahrzehnt überschritten werden.[82]

Wollen sie das Übereinkommen von Paris umsetzen, müssen die Staaten weltweit ihre Klimaschutzanstrengungen schnell und drastisch verstärken. Die aktuelle Politik würde bis Ende des Jahrhunderts immer noch einen Anstieg um rund 3 °C ergeben. Selbst alle bisherigen Zusagen der Regierungen für Emissionsminderungen, genügen lediglich für eine Begrenzung der Erwärmung auf rund 2,6 °C.[83] Daran ändern auch die kurzzeitigen Verringerungen der Treibhausgas-Emissionen während der Covid19-Pandemie nichts.[84]

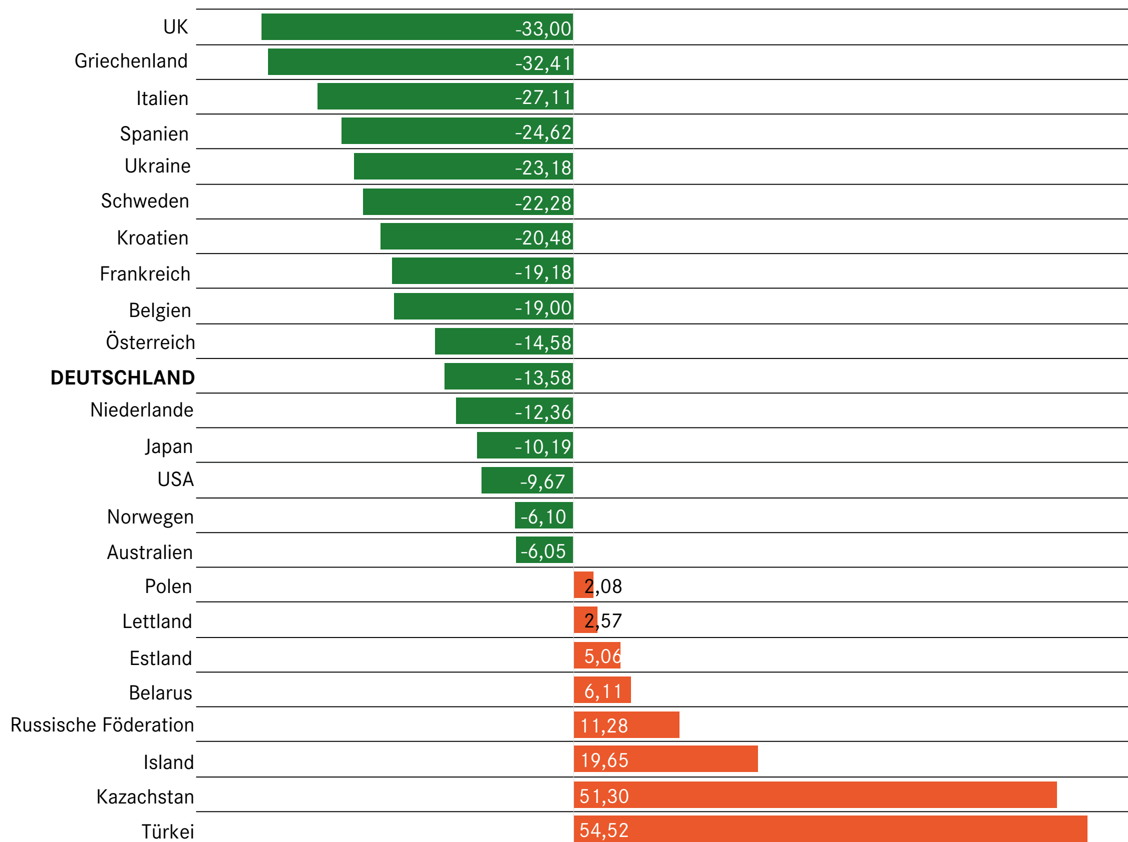
Das vom Menschen ausgestoßene Kohlendioxid bleibt sehr lange in der Luft. Je nach freigesetzter Menge verbleiben zwischen 15 und 40 Prozent bis zu 2.000 Jahre in der Atmosphäre.[85] Die Folgen der bereits vom Menschen verursachten Erwärmung werden sich deshalb für Jahrhunderte bis Jahrtausende fortsetzen. Sie wird langfristige Änderungen im Klimasystem bewirken, wie zum Beispiel weiteren Meeresspiegelanstieg oder Verluste an Artenvielfalt – und damit verbundene, schwerwiegende Folgen für den Menschen.[86]

24. STARKE EMISSIONSSENKUNGEN SIND MÖGLICH

Auch wenn es zweifellos eine große Herausforderung ist: Schnelle und drastische Minderungen der Treibhausgas-Emissionen sind möglich, das zeigen zahlreiche Studien. Viele der dafür notwendigen Technologien existieren und sind teilweise bereits unter den heutigen politischen Rahmensetzungen finanziell konkurrenzfähig.[87]

Etliche Staaten haben in den vergangenen Jahren ihren Ausstoß an Treibhausgasen erheblich gesenkt. So gelang es beispielsweise Dänemark oder Großbritannien zwischen 2005 und 2018 die Emissionen um mehr als ein Drittel zu mindern (siehe Grafik). Belgien und Schweden haben den Kohleausstieg bereits vollzogen, bis 2025 wollen Großbritannien, Irland und Italien folgen. Insgesamt planen nach

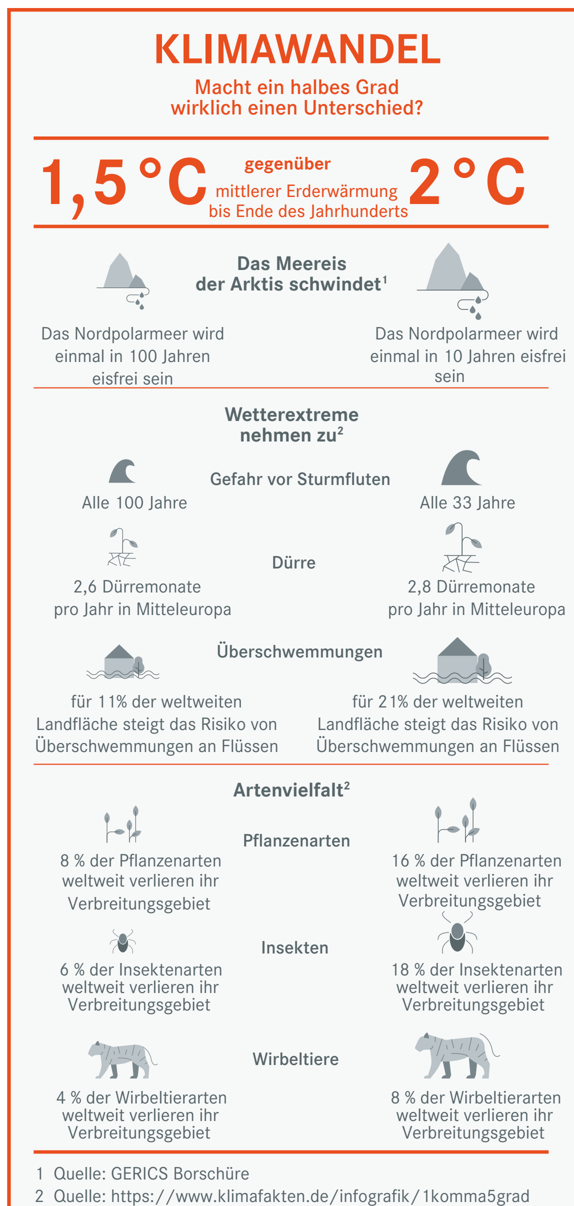
Angaben der EU-Kommission bereits acht Mitgliedsstaaten ein Ende der Kohleverstromung vor dem Jahr 2030.[88]



25. MÖGLICHERWEISE UNUMKEHRBARE VERÄNDERUNGEN

Die sehr lange Lebensdauer von CO_2 in der Atmosphäre bewirkt, dass der Klimawandel (ohne CO_2-Entnahme) nicht schnell zurückgeht. Selbst nach dem Stopp der CO_2-Emissionen würden bestimmte Trends sogar für lange Zeit weiter anhalten, wie der Anstieg der Meeresspiegel. Eisschilde reagieren empfindlich, selbst auf moderate Temperaturänderungen. Ein Beispiel ist der Eispanzer auf Grönland: Er ist gegenwärtig kilometerdick, so dass die Oberfläche in einer Höhe liegt, in der es (wie im Gebirge) kalt ist. Schmilzt er, sinkt die Oberfläche in wärmere Luftschichten und schmilzt immer schneller. Bei einer Erwärmung von 2°C bis 3°C könnte das Eis auf Grönland und der Westantarktis über Zeiträume von mehreren Jahrtausenden vollständig und unumkehrbar abschmelzen. Damit die Eismasse wieder wachsen könnte, müssten die Temperaturen auf der Erde erst auf ein Niveau wie während der letzten Eiszeit sinken (und damit im globalen Mittel um rund 4 °C gegenüber heute). Als weiteres Kipp-Element gilt die Vernichtung des Amazonas-Regenwalds, die bis Ende dieses Jahrhunderts möglich ist, insbesondere wenn neben dem Einfluss des Klimawandels die Abholzung weiter fortschreitet. Manche Kipp-Elemente verstärken die globale Erwärmung zusätzlich, weil sie weitere Treibhausgase freisetzen. Dies gilt etwa für das Tauen von Permafrostböden, wodurch große zusätzliche Mengen Methan oder Kohlendioxid freigesetzt werden könnten.[89] Voraussichtlich bleiben dabei jedoch die anthropogenen Treibhausgasemissionen der dominante Beitrag zum Klimawandel.

26. JEDES ZEHNTELGRAD ZÄHLT



Selbst scheinbar geringe globale Erwärmungen können schwerwiegende Folgen haben. Wenn sich die Erde zum Beispiel um 1,5 Grad Celsius gegenüber dem vorindustriellen Niveau erwärmt, werden voraussichtlich 70 bis 90 Prozent der weltweiten Korallenriffe absterben – bei 2 °C praktisch alle (98 bis 99 Prozent).[90] Ein zeitweise eisfreier Nordpol ist bei 1,5 Grad Celsius Erwärmung rund alle 40 Jahre zu erwarten – bei 2 °C jedoch alle drei bis fünf Jahre.[91] Eine Sturmflut, wie sie bisher an der Nordseeküste bei Cuxhaven statistisch alle 500 Jahre auftritt, wird bei 1,5 Grad Celsius Erwärmung einmal in hundert Jahren erwartet – bei 2 °C jedoch alle 33 Jahre.[92]

Das Ziel, die globale Erwärmung auf höchsten 1,5 Grad Celsius zu begrenzen, ist erreichbar. Laut IPCC dürfen wir dazu noch etwa 420 Gigatonnen Kohlendioxid ab dem 1. Januar 2018 ausstoßen (67 Prozent Wahrscheinlichkeit).[93] Allein im Jahr 2020 betrugen die anthropogenen CO_2-Emissionen weltweit um die 40 Gigatonnen.[94] Würde dieses Emissionsniveau beibehalten werden, wäre das Restbudget also in rund zehn Jahren „aufgebraucht“. Wenn die Menschheit trotz Emissionsminderungen mehr als dieses Restbudget ausstößt, müssen wir der Atmosphäre zusätzlich bereits ausgestoßene Treibhausgase wieder entziehen. Fachleute sprechen hier von „negativen Emissionen“. Möglich wäre dies zum Beispiel durch großflächige Aufforstungen oder neue Technologien. Die Umsetzbarkeit und mögliche negative Nebenwirkungen werden derzeit intensiv erforscht.

Der IPCC schrieb deshalb 2018 im Vorwort zu seinem Sonderbericht über 1,5 Grad globale Erwärmung: „Jedes bisschen an Erwärmung zählt.“[95]

Quellenangaben

[1] Eine Kurzzusammenfassung des Forschungsstandes in nur zehn (englischen) Worten stammt von Anthony Leiserowitz von der Yale University: „It's real. It's us. Experts agree. It's bad. There's hope." – siehe: https://www.youtube.com/watch?v=TbtVXWNrN9o
zu Punkt 4 siehe u.a.: https://www.klimafakten.de/konsens; https://dip21.bundestag.de/dip21/btd/19/126/1912631.pdf

[2] https://www.deutsches-klima-konsortium.de/de/klimafaq-12-3.html

[3] IPCC 2001, AR3 (TAR), WG1, Kap. 1.1.2 und 1.2.1 - https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/TAR-01.pdf

[4] siehe u.a.: IPCC 2014, AR5 SYR, Kap. 1.2.2 – https://www.de-ipcc.de/media/content/IPCC-AR5_SYR_barrierefrei.pdf;
IPCC 2014, AR5, WG3, FAQ 1.2 – https://www.de-ipcc.de/media/content/AR5_WG3_FAQ_barrierefrei.pdf;
IPCC 2019, SRCCL, Kap.2.3 – https://www. ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/08/05_Chapter-2-V3.pdf

[5] https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html

[6] https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen#kohlendioxid-

[7] IPCC 2014, AR5 SYR, Kap. 1.2 – https://www.de-ipcc.de/media/content/IPCC-AR5_SYR_barrierefrei.pdf;
https://www.nature.com/articles/s41598-020-67154-8

[8] https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends_ch4/; https://www.globalcarbonproject.org/;
https://www.carbonbrief.org/scientists- concerned-by-record-high-global-methane-emissions

[9] IPCC 2019, SRCCL, Kapitel 2.3.2 bzw. 2.3.3 –
https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/chapter-2/#article-2-3-greenhouse-gas-fluxes- between-land-and-atmosphere

[10] https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter03_FINAL.pdf#page=11

[11] vgl. z.B. https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Proxydaten; IPCC 2013, AR5, WG1,
Kap. 5 – https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter05_FINAL.pdf

[12] IPCC 2014, AR5, SYR, SPM, SPM1.2 – https://www.de-ipcc.de/media/content/IPCC-AR5_SYR_barrierefrei.pdf

[13] https://www.klimafakten.de/behauptungen/behauptung-die-sonne-verursacht-den-klimawandel#lang

[14] https://www.deutsches-klima-konsortium.de/de/klimafaq-5-1.html, https://www.klimafakten.de/kaltesonne

[15] https://www.deutsches-klima-konsortium.de/de/klimafaq-11-2.html;
https://www.deutsches-klima-konsortium.de/de/klimafaq-5-1. html

[16] IPCC 2013, AR5, WG1, Kapitel 9 – https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter09_FINAL.pdf sowie
FAQ, Frage 9.1 – https://www.de-ipcc.de/media/content/IPCC_AR5_WGI_FAQ_deutsch.pdf; aktuell: Hausfather et al. 2019 –
https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019GL085378

[17] https://www.klimafakten.de/behauptungen/behauptung-klimamodelle-sind-nicht-verlaesslich;
zur Klimasensitivität bei CMIP6-Modellrechnungen: https://www.klimanavigator.eu/dossier/artikel/086719/index.php,
https://www.carbonbrief.org/cmip6-the-next-generation-of-climate-models-explained

[18] https://klimanavigator.eu/dossier/artikel/011977/index.php

[19] https://www.nature.com/articles/nclimate2554

[20] IPCC 2014, AR5, SYR, SPM 1.1 – https://www.de-ipcc.de/media/content/IPCC-AR5_SYR_barrierefrei.pdf;
PAGES 2K Consortium 2019: https://www.nature.com/articles/s41561-019-0400-0.epdf,
Neukom et al. 2019: https://www.nature.com/articles/s41586-019-1401- 2.epdf

[21] IPCC 2018, SR1.5, SPM A.1 – https://www.de-ipcc.de/media/content/SR1.5-SPM_de_barrierefrei.pdf;
WMO 2020: https://library. wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10211

[22] Kaufman et al. 2020: https://www.nature.com/articles/s41597-020-0445-3

[23] IPCC 2013, AR5, WG 1, SPM, B.1 – https://www.de-ipcc.de/media/content/AR5-WGI_SPM.pdf

[24] https://www.ncei.noaa.gov/news/global-climate-202012

[25] https://www.noaa.gov/news/2020-was-earth-s-2nd-hottest-year-just-behind-2016;
siehe auch wmo 2020: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10444

[26] https://climate.copernicus.eu/2020-warmest-year-record-europe-globally-2020-ties-2016-warmest-year-recorded

[27] https://earthobservatory.nasa.gov/images/147794/2020-tied-for-warmest-year-on-record

[28] https://arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2020/ArtMID/7975/ArticleID/891/Sea-Ice

[29] IPCC 2018, SROCC, SPM, A.1.4 – https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/summary-for-policymakers/

[30] IPCC 2018, SROCC, SPM, A.1.4 – https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/summary-for-policymakers/

[31] IPCC 2018, SROCC, SPM, A.1.1 – https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/summary-for-policymakers/

[32] http://nsidc.org/greenland-today/ — http://nsidc.org/greenland-today/greenland-today-data-and-analysis-tools/

[33] IPCC 2018, SROCC, SPM, A.1.1 – https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/summary-for-policymakers/

[34] Umgerechnet in die entsprechende Wassersäule (meters water equivalent) – https://wgms.ch/latest-glacier-mass-balance-data/

[35] https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-glaciology/article/historically-unprecedented-global-glacier-decline-in-the-early-21st-century/2F1E3ACB111A03F9BA83D11439F5D681

[36] https://science.sciencemag.org/content/345/6199/919

[37] IPCC 2018, SROCC, Technical Summary, TS.2 – https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/04_SROCC_TS_FINAL.pdf

[38] https://climate.nasa.gov/vital-signs/sea-level/

[39] IPCC 2018, SROCC, SPM, A.3.1 und A.3.2 – https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/summary-for-policymakers/;
https://climate.nasa. gov/vital-signs/sea-level/

[40] IPCC 2018, SROCC, SPM, A.3.4 und Kapitel 4.2.2.3 – https://www.ipcc.ch/srocc/, http://sealevel.colorado.edu/faq
[41] https://www.nature.com/articles/s41558-021-00993-z
[42] IPCC 2013, AR5, WG 1, SPM, B.5 – https://www.de-ipcc.de/media/content/AR5-WGI_SPM.pdf
[43] IPCC 2018, SROCC, SPM, A.2.5 – https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/summary-for-policymakers/
[44] IPCC 2013, AR5, WG 1, Kapitel 3, Box 3.2 – https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter03_FINAL.pdf
[45] IPCC 2018, SROCC, SPM, A.6.4 und B.5.4 – https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/summary-for-policymakers/
[46] IPCC 2019, SRCCL, SPM, A2.2 – https://www.de-ipcc.de/media/content/SRCCL-SPM_de_barrierefrei.pdf
[47] Blöschl et al. 2019: https://www.nature.com/articles/s41586-019-1495-6
[48] Kossin et al. 2020: https://www.pnas.org/content/117/22/11975; https://www.gfdl.noaa.gov/global-warming-and-hurricanes/; IPCC 2019, SROCC, Kap. 6 – https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/10_SROCC_Ch06_FINAL.pdf
[49] IPCC 2019, SRCCL, SPM, A2.8 – https://www.de-ipcc.de/media/content/SRCCL-SPM_de_barrierefrei.pdf
[50] Kaspar et al. (DWD) 2020: https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20200128_vergleich_de_global.pdf
[51] Imbery F, Kaspar F, Friedrich K, Plückhahn B (2021): https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20210106_rueckblick_jahr_2020.pdf
[52] www.dwd.de/zeitreihen
[53] Kaspar et al. (DWD) 2020: https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20200128_vergleich_de_global.pdf
[54] www.dwd.de/zeitreihen
[55] https://www.hamburg.de/pressearchiv-fhh/13757034/2020-03-25-bue-winter/
[56] Brasseur/Jacobs/Schuck-Zöller (Hrsg.): Klimawandel in Deutschland. Springer-Wissenschaft 2017, S. 138 – https://www.springer.com/ de/book/9783662503966; Auswertung des Institut für Wetter- und Klimakommunikation 2012; https://isabel.dwd.de/DE/leistungen/ nationalerklimareport/download_report_auflage-4.pdf
[57] Becker, P. et al. (DWD) 2016: www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/niederschlag/20160719_entwicklung_starkniederschlag_deutschland.html?nn=344870; Berg et al., 2013: https://www.nature.com/articles/ngeo1731; Becker, 2019: https://www.springerprofessional.de/extremerer-niederschlag-im-klimawandel-was-wissen-wir/17465638
[58] Giorgi et al. 2011: https://doi.org/10.1175/2011JCLI3979.1
[59] Giorgi et al. 2019: https://doi.org/10.5194/esd-10-73-2019
[60] Bryne und O'Gorman, 2016: https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0351.1
[61] UBA 2019: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/das_monitoringbericht_2019_barrierefrei.pdf#page=28
[62] Hari et al. 2020: https://www.nature.com/articles/s41598-020-68872-9
[63] https://www.ufz.de/index.php?de=47252
[64] de Brito, M.M., Kuhlicke, C., Marx, A. 2020: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aba4ca/meta
[65] https://www.deutschlandfunk.de/binnenschifffahrt-im-klimawandel-wenn-die-elbe-nur-noch.724.de.html?dram:article_id=458866, https://www.zeit.de/wirtschaft/2018-11/flusspegel-pegelstaende-niedrigwasser-rhein-lieferengpaesse-benzin-diesel-duerre, https://www.helmholtz-klima.de/sites/default/files/medien/dokumente/duerre_factsheet_de.pdf
[66] https://rp-online.de/politik/deutschland/hitzesommer-2018-senkte-leistung-von-atom-und-kohlekraftwerken_aid-39678285
[67] https://www.bafg.de/DE/05_Wissen/04_Pub/04_Buecher/niedrigwasser_2018_dokument.pdf?__blob=publicationFile
[68] L. Samaniego et al, 2018: https://www.nature.com/articles/s41558-018-0138-5, https://www.ufz.de/index.php?de=42489; Marx, A. et al 2018: https://doi.org/10.5194/hess-2017-485
[69] IPCC 2014, AR5, WG 2, Kapitel 4.3.2.5.1 – https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-Chap4_FINAL.pdf; IPCC 2019, SRCCL, Kapitel 2.2.4 – https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/08/05_Chapter-2-V3.pdf
[70] Brasseur/Jacobs/Schuck-Zöller (Hrsg.): Klimawandel in Deutschland. Springer-Wissenschaft 2017, S. 153f. https://www.springer.com/de/book/9783662503966
[71] https://www.dwd.de/DE/leistungen/nationalerklimareport/download_report_auflage-4.pdf?__blob=publicationFile&v=11#page=35; Kaspar et al. 2014: https://doi.org/10.5194/asr-11-93-2014
[72] https://bfn.buchweltshop.de/nabiv-heft-98-auswirkungen-des-rezenten-klimawandels-auf-die-fauna-in-deutschland.html
[73] Brasseur/Jacobs/Schuck-Zöller (Hrsg.): Klimawandel in Deutschland. Springer-Wissenschaft 2017, S. 154 – https://www.springer.com/ de/book/9783662503966
[74] https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/klimaschutz/extremwetterlagen-zustaendigkeiten.html
[75] https://www.bmel.de/DE/themen/wald/wald-in-deutschland/wald-trockenheit-klimawandel.html; https://www.thuenen.de/de/thema/waelder/forstliches-umweltmonitoring-mehr-als-nur-daten/waldschaeden-durch-trockenheit-und-hitze/
[76] www.deutscher-klimaatlas.de
[77] UBA 2019: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/das_monitoringbericht_2019_barrierefrei.pdf#page=58
[78] Hinrichs et al. 2019: https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2019.00158/full; Antworten der Bundesregierung vom 8. Juni bzw. 2. Juli 2020 auf eine Schriftliche Frage der Bundestagsabgeordneten Steffi Lemke – https://www.steffi-lemke.de/uploads/2020/07/Schriftliche_Frage_Temperaturanstieg.pdf
[79] https://www.dwd.de/DE/leistungen/nationalerklimareport/download_report_auflage-4.pdf?__blob=publicationFile&v=11#page=32
[80] https://www.deutsches-klima-konsortium.de/fileadmin/user_upload/pdfs/Publikationen_DKK/dkk-kdm-meeresspiegelbroschuere-web.pdf, S. 22

[81] IPCC 2013, AR5, WG1, SPM E.1 – https://www.de-ipcc.de/media/content/AR5-WGI_SPM.pdf

[82] IPCC 2018, SR1.5, SPM, A.1 – https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/03/SR1.5-SPM_de_barrierefrei-2.pdf

[83] https://climateactiontracker.org/

[84] Tollefson 2020: https://www.nature.com/articles/d41586-020-01497-0; https://www.newscientist.com/article/2245330-co2-levels-hit-record-high-despite-emissions-dip-from-coronavirus/

[85] https://www.deutsches-klima-konsortium.de/de/klimafaq-6-2.html

[86] IPCC 2018, SR1.5, SPM, A.2 – https://www.de-ipcc.de/media/content/SR1.5-SPM_de_barrierefrei.pdf

[87] IPCC 2018, SR1.5, SPM, C.1f. – https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/03/SR1.5-SPM_de_barrierefrei-2.pdf

[88] https://phys.org/news/2019-06-eu-countries-phase-coal.html

[89] Lenton et al. 2019: https://www.nature.com/articles/d41586-019-03595-0

[90] Schleussner et al. 2016: https://esd.copernicus.org/articles/7/327/2016/esd-7-327-2016.pdf

[91] Screen 2018: https://www.nature.com/articles/s41558-018-0137-6

[92] Rasmussen et al. 2018: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aaac87; vgl. generell zum Thema auch IPCC 2018, SR1.5 – https://www.ipcc.ch/sr15/

[93] https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_Low_Res.pdf

[94] https://essd.copernicus.org/articles/12/3269/2020/

[95] IPCC 2018, SR1.5, Vorwort – https://www.ipcc.ch/sr15/about/foreword/

Die Abbildung auf dem Titelblatt zeigt die sogenannten „Warming Stripes“ für den Zeitraum 1850 bis 2019 – jeder Streifen steht für ein Jahr, die Farbe richtet sich nach der globalen Mitteltemperatur des jeweiligen Jahres, dabei steht Blau für kühl, Rot für warm; Grafik: Ed Hawkins/www.showyourstripes.info

Herausgegeben von:
Deutsches Klima-Konsortium, Deutsche Meteorologische Gesellschaft, Deutscher Wetterdienst,
Extremwetterkongress Hamburg, Helmholtz-Klima-Initiative, klimafakten.de